

## МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ МНОГОЧАСТОТНОГО ЛИДАРА

С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: lisenko@bsu.by

Для централизованного мониторинга загрязненности воздуха в различных районах города, а также для дистанционного определения источника загрязнения и исследования переноса аэрозоля в атмосфере наиболее перспективными являются лидарные методы. Известные методы обработки лидарных сигналов требуют априорной информации о значении восстанавливаемой оптической характеристики аэрозоля (коэффициента ослабления  $\epsilon$  или обратного рассеяния  $\beta_\pi$ ) на некотором участке трассы зондирования. При вертикальном зондировании атмосферы калибровку лидара можно провести по сигналам молекулярного рассеяния с больших высот в атмосфере, на которых аэрозоль практически отсутствует. Однако при зондировании приземных трасс в атмосфере подобная калибровка не представляется возможной, поскольку аэрозоль присутствует на всей трассе.

Авторами разработаны методы калибровки многочастотного лидара, не требующие привлечения дополнительных измерений для тех трасс зондирования, которые включают однородный участок или два неоднородных участка со схожим пространственным ходом аэрозольного коэффициента ослабления. Предложены алгоритмы поиска таких участков на трассе, основанные на анализе спектрально-временной структуры лидарного сигнала и установленных регрессионных соотношениях между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления.

Первый метод сводит задачу выделения однородного участка на зондируемой трассе к задаче поиска минимума функционала, в котором первое слагаемое представляет собой среднеквадратичное отклонение логарифмов сигналов на рабочих длинах волн лидара  $\lambda_i$  относительно линейных зависимостей, справедливых для однородного участка трассы, а второе характеризует соответствие коэффициентов  $\epsilon(\lambda_i)$ , найденных по скорости убывания соответствующих им сигналов на анализируемом участке, свойству мультиколлинеарности, выраженной в форме уравнения множественной регрессии. Используемая регрессия получена в рамках оптической модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической организацией, при широкой вариации модельных параметров, характеризующих распределение частиц по размерам и комплексный показатель преломления аэрозольного вещества.

Для работоспособности данного метода необходимо, чтобы оптическая толщина однородного участка была достаточной для заметного изменения на нем лидарного сигнала на фоне погрешности его измерений. В атмосферных ситуациях, характеризующихся малым содержанием аэрозоля на трассе, а также при зондировании атмосферы в ближней ИК области спектра такой однородный участок трассы должен быть достаточно протяженным, что далеко не всегда выполнимо в действительности. В связи с этим нами разработан альтернативный метод калибровки многочастотного лидара, основанный на определении опорных значений оптической толщины протяженного неоднородного участка трассы, расположенного между двумя участками с близкими оптическими характеристиками. Анализируемой величиной в данном методе является эхосигнал от точек трассы  $r \in [r_1, r_2]$ , нормированный на интегральный сигнал  $I(r_1, r_2)$  от всего участка  $[r_1, r_2]$ , который зависит лишь от профиля коэффициента ослабления  $\varepsilon(r)$  на этом участке. О близости профилей  $\varepsilon(r)$  на участках  $[r_1, r_2]$  и  $[r_3, r_4]$  можно судить по соответствующим им нормированным сигналам, а оптическую толщину участка  $[r_1, r_3]$  —  $\tau(r_1, r_3)$ , необходимую для калибровки лидара, определять на основе отношения сигналов  $I(r_1, r_2)$  и  $I(r_3, r_4)$ . Для повышения достоверности оценок  $\tau(r_1, r_3)$  используется вышеотмеченное регрессионное соотношение между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления.

Проведены численные эксперименты по восстановлению пространственных распределений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля из лидарных сигналов, демонстрирующие правомерность разработанных методов. Показано, что при отсутствии априорной информации о микроструктуре аэрозоля, средние по трассе лидарные отношения  $S_a(\lambda_i) = \varepsilon(\lambda_i)/\beta_\pi(\lambda_i)$ , необходимые для разрешения системы лидарных уравнений для длин волн зондирующего излучения, также можно выбирать, исходя из спектральных особенностей восстанавливаемой оптической характеристики аэрозоля, поскольку необходимость соответствия восстанавливаемых профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  полученному уравнению регрессии накладывает ограничения на задаваемые значения  $S_a(\lambda_i)$ . Такой критерий выбора  $S_a(\lambda_i)$  позволяет в значительной степени повысить достоверность восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  по сравнению с произвольным выбором  $S_a(\lambda_i)$  или использованием средних значений  $S_a(\lambda_i)$  для исследуемого типа аэрозоля. Это особенно ощутимо в тех случаях, когда однородный участок среды, используемый для калибровки лидара, располагается в начале трассы зондирования, поскольку решение лидарного уравнения с опорной точкой в начале трассы зондирования является неустойчивым и характеризуется наличием краевого эффекта.